

Experimental Analysis of Axial Bearing Capacity of Centrifugal Concrete Filled Steel Tubular Pile

Tao Zhang

Baosteel Zhanjiang Iron & Steel Co. Ltd., Zhanjiang Guangdong
Email: bgzt@baosteel.com

Received: Mar. 2nd, 2016; accepted: Mar. 25th, 2016; published: Mar. 29th, 2016

Copyright © 2016 by author and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

In order to make the long pile to penetrate the strong and weak soil layer and reach the bearing layer, centrifugal concrete filled steel tubular piles are developed for some important projects. Pile driven experiment shows that centrifugal concrete filled steel tubular piles fit the geological condition better than PHC pile. Single pile static axial load experiment, short column static axial load experiment and the bearing capacity computation results show that centrifugal concrete filled steel tubular pile can one by one replace the concrete filled steel tubular pile of the same diameter originally used in projects.

Keywords

Long Pile, Bearing Layer, Thin Wall Steel Tube, Concrete Filled Steel Tubular Pile, Centrifugal Concrete

薄壁钢管离心混凝土管桩轴向承载力试验分析

张 涛

宝钢湛江钢铁有限公司, 广东 湛江
Email: bgzt@baosteel.com

收稿日期: 2016年3月2日; 录用日期: 2016年3月25日; 发布日期: 2016年3月29日

摘要

对于部分使用长桩的建设项目工程区域的持力层上方存在较厚的坚硬土层和软弱夹层地质条件，研究开发薄壁钢管离心混凝土管桩。现场打桩试验证明薄壁钢管离心混凝土管桩的抗锤击能力比PHC桩优越。现场单桩静荷载试验、实验室短柱轴向压力试验和桩身承载力计算说明薄壁钢管离心混凝土管桩的轴向承载力满足一对一替代原有的同直径规格钢管混凝土桩的要求。

关键词

长桩，持力层，薄壁钢管，钢管混凝土桩，离心混凝土

1. 概述

1.1. 工程用桩概况

宝钢宝山基地地下 6~20 m 为淤泥质软土地层，约 60~70 m 深才出现可作长桩的持力层的粉细砂层，因此在一期工程中根据类似地质条件的日本钢厂建设经验，确定以第四系长江河口相沉积粉细砂层为持力层的约 60 m 长的超长桩作为重要的厂房基础、重荷载的设备基础、对差异沉降要求严格的设备基础和振动大的动力设备基础。根据当时的技术条件和工程大规模、高速度、高质量建设的需要，确定约 60 m 的超长桩采用钢管桩。近三十年来的生产运行证明，桩基设计选型是合理的，质量是可靠的。

由于冶金工程桩基用量巨大，宝钢工程技术界一直在致力于对桩型的技术创新以保证工程质量并节省投资，在一期工程中对因基坑开挖引起较大侧移的钢管桩采用灌入混凝土的方法进行加固处理；在二期工程中对因德方设计遗漏锈蚀厚度的钢管桩采用灌入混凝土的方法进行加固处理；三期工程成功解决了钢管桩桩尖偏移和深处灌入混凝土等问题，研制成功钢管混凝土桩并全面推广使用以代替钢管桩大量节省工程投资。后来，经过 90 年代后期高速线材等项目小规模尝试，结合其他建设项目 PHC 桩(预应力高强度混凝土管桩)的工程经验，宝钢组织 PHC 桩工程试验和技术攻关，在十五规划项目大规模使用 PHC 桩代替钢管桩和钢管混凝土桩并节省工程投资数亿元。目前没有第⑧层软弱夹层的项目主要以 PHC 桩作为长桩桩型。

自一期工程以来，对于以⑨1 粉细砂层做持力层的钢管桩和钢管混凝土桩在没有第⑧层软弱夹层的场地以打入深度和贯入量双控作为停锤标准，部分场地实际停锤持力层就在⑦1 砂质粉土层中下部；在有第⑧层软弱夹层的场地则要求打穿第⑧层，停锤持力层在土层⑧底部或⑨1 土层顶部。因部分场地存在 20~30 m 厚较坚硬的砂质粉土层⑦1 和粉细砂层⑦2，且在持力层⑨1 土层上方普遍分布 5~10 m 厚的软弱⑧1 粉质粘土层，因此 PHC 桩要打穿较坚硬的⑦1、⑦2 土层容易发生断桩现象(简便起见，本文将此种场地简称为特征地质区域)。

为满足工程建设质量要求且投资节省，借鉴日本离心混凝土管桩的技术，宝钢组织研究开发出一种综合钢管混凝土桩抗锤击和 PHC 桩省投资的新桩型，也就是抗锤击能力比 PHC 桩强而造价比钢管混凝土桩节省的薄壁离心混凝土管桩(以下简称 TSC 桩) [1]。TSC 桩主要有两种规格，TSCΦ400 桩是以外直径 396 mm、壁厚 6 mm 的钢管灌入混凝土离心成型后形成 87 mm 厚的内衬混凝土断面桩材，TSCΦ600 桩是以外直径 596 mm、壁厚 6 mm 的钢管灌入混凝土离心成型后形成 107 mm 厚的内衬混凝土断面桩材，钢管的材质为 Q235B(部分为 Q345B)，离心混凝土的强度等级为 C80。

1.2. 特征地质区域地基土的构成与分布

根据钻探所揭示的地质资料，特征地质区域地基土的构成与特征自上而下分述如下：

(1) 杂填土(地层编号①1-1):

杂色，主要由矿渣、碎石、砖渣及粘性土等组成，或为沥青路面。呈稍湿、松散状态。层厚 0.30 m~5.70 m，层底标高为 4.28 m~-1.64 m。矿渣堆场地段厚度稍大。

(2) 素填土(地层编号①1-2):

由褐黄色~灰色粉质粘土组成，含少量砖渣及碎石，部分地段下部由碎石组成，厚度一般在 0.40 m~3.40 m；呈湿、松散状态。老护厂河地段的素填土由黄褐色及灰色粘性土组成，含 10%~20%的碎石及块石，碎石及块石粒径在 10~60 cm 之间。该层回填时间短，呈湿~饱和、松散状态；层厚为 1.00 m~5.60 m。

(3) 粉质粘土(地层编号②):

褐黄~灰黄色，含氧化铁斑点及铁锰结核，状态自上而下逐渐变软，砂性加重，呈饱和、可塑~软塑状态。该层层厚为 0.30 m~3.90 m，层底标高为 1.89 m~-0.9 m。

(4) 淤泥质粉质粘土(地层编号③1):

灰色，含少量腐植物及贝壳碎片，夹薄层粉土与粉砂，呈饱和、流塑状态。该层层厚为 0.20 m~4.00m，层底标高为 1.04 m~-3.16 m。

(5) 粉质粉土(地层编号③2-1):

灰色，含云母片，夹薄层淤泥质粉质粘土、粘质粉土及粉砂，呈饱和、松散~稍密状态。该层层厚为 0.30 m~5.00 m，层底标高为 0.65 m~-4.81 m。

(6) 砂质粉土(地层编号③2-2):

青灰色，含云母片，夹薄层淤泥质粉质粘土、粘质粉土及粉砂，呈饱和、松散~稍密状态。该层层厚为 0.50 m~5.20 m，层底标高为-1.41 m~-5.10 m。

(7) 淤泥质粉质粘土(地层编号③3):

灰色，含少量腐植物及贝壳碎片，夹薄层粉土与粉砂，呈饱和、流塑状态。该层层厚为 0.80m~8.20m，层底标高为-5.13 m~-8.76 m。

(8) 淤泥质粘土(地层编号④):

灰色，含有机质及少量贝壳碎片，夹微薄层粉砂，土质均匀，呈饱和、流塑状态。该层层厚为 6.60 m~17.20 m，层底标高为-14.22 m~-23.26 m。

(9) 粉质粘土(地层编号⑤1):

灰色~褐灰色，含少量腐植物及钙质结核，偶夹薄层粉土，呈饱和、软塑~可塑状态。该层层厚为 23.50 m~32.00 m，层底标高为-42.22 m~-49.00 m。

(10) 粉质粘土(地层编号⑤3):

褐灰~灰色，夹薄层粉土及粉细砂，下部粉土较重，呈“千层饼”状，偶含少量钙质结核及腐植物，呈饱和、软塑~可塑状态。该层层厚为 0.80 m~15.10 m，层底标高为-45.94 m~-60.42 m。

(11) 砂质粉土(地层编号⑦1):

青灰~灰色，含云母片，夹薄层粘性土及粉细砂，局部为砂质粉土夹粉质粘土或砂质粉土与粉质粘土互层，呈饱和、稍密~中密状态。该层层厚为 0.60 m~18.40 m，层底标高为-48.23 m~-70.70 m。

(12) 粉质粘土(地层编号⑧1):

褐灰~灰色，夹薄层粉土及粉细砂，呈湿~饱和、软塑~可塑状态。底部常有粉质粘土与粉土、粉细砂互层。该层层厚为 1.00 m~28.20 m，层底标高为-52.42 m~-78.83 m。

(13) 粉细砂(地层编号⑨1):

青灰~灰色,成份以石英、长石为主,含云母片,该层顶部多夹薄层粘性土及砂质粉土,呈饱和、中密~密实状态。该层层厚为 1.30 m~16.70 m,层底标高为-77.60 m~-80.52 m。

(14) 含砾中砂(地层编号⑨2):

灰白色,成份以石英、长石为主,含少量砾石,呈饱和、密实状态。钻探未穿透该层。物理、力学性质好,标贯击数高,具有低压缩性、高强度的特性,是荷重大且对沉降要求极严格的建筑物桩基理想的持力层。

2. 桩的打入试验

2.1. TSC Φ 400 桩的打入试验

在特征地质区域试打入 24 根 TSC Φ 400 桩和 18 根 TSC Φ 400 桩,桩长在 72 m~84 m 之间。

因为混凝土的抗拉强度比较低而 TSC 桩不像 PHC 桩那样有预压应力。在锤击脉冲作用下,桩底端或顶端会出现反射波拉应力。试打桩优先考虑通过打桩技术来解决这一问题,采取选用重锤、增厚锤垫、限定落锤高度三项施工技术措施延长锤击入射脉冲作用时间,减小锤击脉冲峰值压应力和反射拉应力,使反射拉应力能够与入射压应力迭加而减小混凝土收到的拉应力,达到防止桩内混凝土开裂或在反复拉压力作用下发生碎裂的目的。

对于 TSC400 桩,试打桩时选用采用锤芯重 8t 的 D80 型锤,在试打第一组长度 84 m TSC 桩时,除第一根因缺乏经验锤跳高度控制较低总锤击数达 3127 级以外,其他桩总锤击数在 1500~2500 击之间;试打第二组长度 76m TSC 桩时,总锤击数在 1000 击左右;试打第三组长度 79 m TSC 桩时,总锤击数基本分布在 1500~2000 击之间。对于试打的 24 根 TSC400 桩,总锤击数小于 2000 击的有 20 根,占 83.3%。打桩高应变检测发现其桩身完好率 β 在 80%~100%之间的有 23 根,占 95.8%,且其中 β 为 100%有 18 根,占 75%。只有一根 S4-3 桩在桩顶下 50 余米的桩节锚固钢筋部位混凝土出现异常,桩身完好率 β 为 58%,且下方无反射波信号。

对于 TSC600 桩,在试打第一组长 72 m 的 14 根桩时采用锤芯重 8 t 的 D80 型锤。由于锤芯相对较轻,总锤击数大于 2000 击的有 7 根,占 50%,其中总锤击数大于 3000 击的有 3 根,最大总锤击数达 4268 击。在试打第二组桩长 75~84 m 的 4 根桩时采用锤芯重 10t 的 D100 型锤。其总锤击数分布在 1500~2500 击之间。打桩高应变检测发现 TSC600 桩桩身完好率 β 比 TSC400 桩稍差,只有一根 S6-3 桩在桩顶下 15~20 米部位混凝土出现异常,桩身 β 为 62%,且下方无反射波信号。

各试验桩的总锤击数如图 1、图 2 所示。

2.2. 小规模工程试验

为检验 TSC 桩在大规模工程应用的适应性,在某项目进行了 160 根 TSC Φ 400 mm 桩工程应用试验。采用锤芯重 8t 的 D80 型锤打桩,除 20 根属调节沉降差的桩外,140 根为打入深度大于 70 m 的长桩,大部分桩桩顶送入地下深度超过 13 m。打桩结果全部满足停锤标准,其中锤击次数小于 2000 击的 125 根并达到预定打入深度,占 89.3%。

总锤击数和对应桩数如图 3 所示。

3. 单桩静载试验

3.1. TSC Φ 400 长桩单桩静载压力试验

以 600 kN 为加载增量,对三根长分别为 84 m、79 m 和 76 m 的 TSC Φ 400 长桩采用锚桩法提供反力进行轴向静载压力试验,考虑到锚桩抗拔能力,在加载至 5400 kN 满足设计要求的情况下继续加载至轴

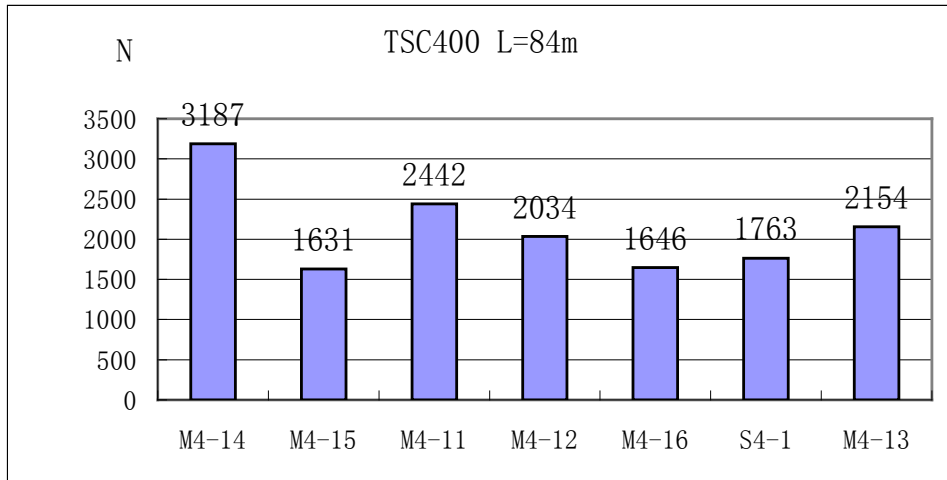


Figure 1. The total blow counts of the first group for piling test TSCΦ400
图 1. 试打第一组 TSCΦ400 桩总锤击数

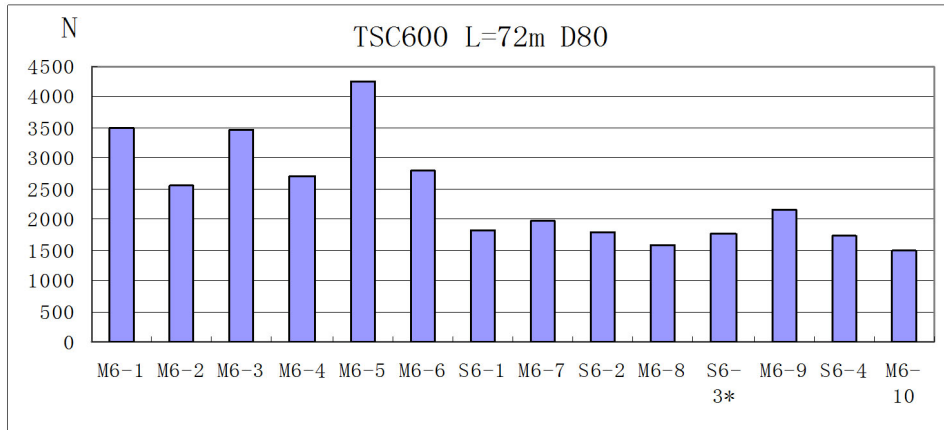


Figure 2. The total blow counts of the first group for piling test TSCΦ600
图 2. 试打第一组 TSCΦ600 桩总锤击数

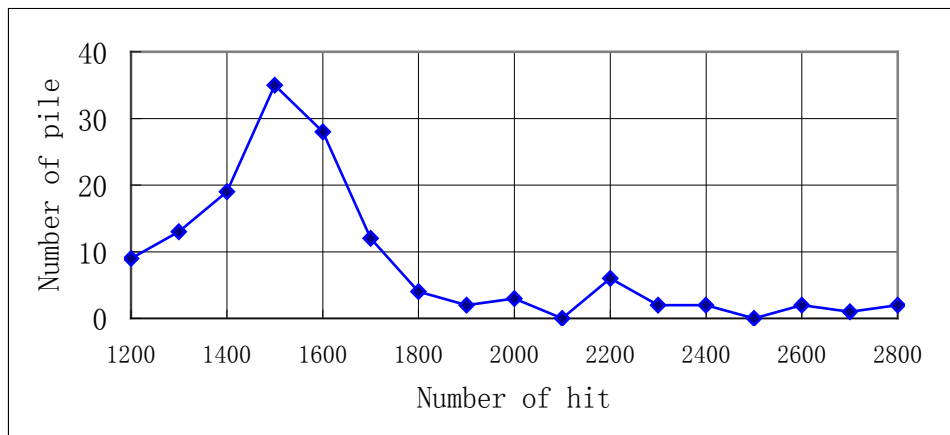


Figure 3. The distribution of total blow and piles of TSCΦ400
图 3. TSCΦ400 桩总锤击数及对应桩数分布情况

向压力 6600 kN 时桩身和地基土都未破坏，其结果列简表如表 1 所示。

Table 1. Main results of static load test of single pile TSCΦ400

表 1. TSCΦ400 桩单桩静载试验主要结果

	S4-1	S4-2	S4-4
桩长(m)	84	76	79
最大荷载(kN)	6600	6600	6600
最大沉降(mm)	71.96	58.68	48.73
残余沉降(mm)	19.91	9.58	17.66

三组试桩 Q~S 曲线呈缓变形,承载力均满足设计要求。根据规范[2]要求, Q-s 曲线呈缓变型时,取桩顶总沉降量 $s = 40$ mm 所对应的荷载值,当桩长大于 40 m 时,宜考虑桩身的弹性压缩。由于待建项目属重型冶金工业厂房,对绝对沉降和差异沉降要求很高,因此可取单桩极限抗压承载力为 6000 kN,大于设计要求的 5400 kN。

对于打桩阶段发现 50 余米深处桩才破坏的 S4-3 桩,采取灌入混凝土的方法进行加固,然后进行加载至 6600 kN,所加荷载已大于设计要求。该试桩最大沉降量为 39.92 mm,承载力满足设计要求。

3.2. TSC Φ 600 长桩单桩静载压力试验

以 800kN 为加载增量,对三根长为 72 m 的 TSCΦ600 长桩采用锚桩法提供反力进行轴向静载压力试验, S6-1、S6-2 试桩均加至 8800 kN, S6-4 试桩加至 8000 kN,桩身及地基土均未破坏。三组试桩 Q~S 曲线平滑, S6-1 最大沉降量为 40.18 mm, S6-2 最大沉降量为 38.91 mm, S6-4 最大沉降量为 37.52 mm,承载力均满足设计要求。

3.3. TSC Φ 400 长桩单桩静载抗拔力试验

以 100 kN 为加载增量,对三根长分别为 84 m、79 m 和 76 m 的 TSCΦ400 长桩采用锚桩法提供反力进行轴向静载抗拔力试验。S4-1 桩长 84m,总加载 1200 kN,总上拔量为 16.14 mm,残余变形量为 4.82 mm; M4-22 桩长 79 m,总加载 1200 kN,总上拔量为 5.58 mm,残余变形量为 1.21 mm; M4-25 桩桩长 76 m,总加载 1200 kN,总上拔量为 7.27 mm,残余变形量为 2.08 mm。三个抗拔力试验桩变形相对稳定, U-Δ 曲线及 Δ-lgt 曲线相对平滑,未出现明显的拐点和向下曲折,经过分析其单桩竖向抗拔承载力达到 1200kN 时桩身及地基土体未破坏,极限承载力大于等于 1200 kN。

3.4. TSC Φ 600 长桩单桩静载抗拔力试验

以 150 kN 为加载增量,对三根长为 72 m 的 TSCΦ600 长桩采用锚桩法提供反力进行轴向静载抗拔力试验。S6-1 桩总加载 1500 kN,总上拔量为 8.40 mm,残余变形量为 3.36 mm; M6-4 桩总加载 1500 kN,总上拔量为 3.24 mm,残余变形量为 1.79 mm; M6-4 桩总加载 1500 kN,总上拔量为 3.24 mm,残余变形量为 1.79 mm。三个抗拔力试验桩变形相对稳定, U-Δ 曲线及 Δ-lgt 曲线相对平滑,未出现明显的拐点和向下曲折,经过分析其单桩竖向抗拔承载力达到 1500kN 时桩身及地基土体未破坏,极限承载力大于等于 1500 kN。

4. 桩身轴向承载力

4.1. TSC Φ 400 短柱轴向压力试验

为确定桩身轴向承载力,采用自平衡法对 TSC Φ 400 短柱进行了两组轴向压力试验。

第一组试验对三根长 1.2 m TSCΦ400 短柱进行轴向压力试验,加载至构件破坏。试件钢材为 Q235B,壁厚为 6 mm,混凝土强度为 C80(离心法成型),厚度不小于 87 mm。预估极限承载力为 8000 kN 左右,故分级加载如表 2 所示。

Table 2. List of stage loading
表 2. 分级加载一览表

分级	1	2	3	4	5	6	7	8
荷载(kN)	1200	1800	2400	3000	3600	4200	4800	5400
分级	9	10	11	12	13	加载至破坏		
荷载(kN)	6000	6600	7200	7800	8400			

根据试验数据得出三根试件的荷载 - 压缩量(Q-S)曲线。取破坏荷载的前一级荷载为极限荷载, 三根试件的极限荷载分别为 7200 kN、8400 kN 和 9000 kN, 平均值 8200 kN, 标准差 917 kN。其中第一次试验试件对中偏差较大, 造成偏压从而导致极限荷载偏小为 7200 kN。

第一组试验对两根长 1.2 m TSCΦ400 短柱进行轴向压力试验, 加载至构件破坏。试件钢材为 Q345B, 壁厚为 4 mm, 混凝土强度为 C80 (离心法成型), 厚度不小于 87 mm。

两根试件的极限荷载分别为 7200 kN、8400 kN 和 8750 kN, 平均值 9175 kN。

4.2. TSC 桩身轴向承载力计算

对于空心的圆钢管混凝土短柱, 其轴向承载力计算方法尚无确定的规范算法, 参考相关规范和计算理论, 主要有以下算法:

(1) 钢管与混凝土之间无紧箍效应考虑, 福泽公夫提出以下计算公式:

$$N_u = A_s f_s + A_c f_c \quad (1)$$

(2) 考虑紧箍效应和空心效应, 对于混凝土内径为 r_{ci} 和外径为 r_{co} , 的空心圆钢管混凝土轴心受压构件中国建筑科学研究院提出以下计算公式:

$$\begin{aligned} N_u &= (1 + \alpha_0 \xi) A_c f_c \\ \psi &= r_{ci} / r_{co} \\ \alpha_0 &= (1.1 + (\xi)^{-0.5}) (1 - \psi^2) \end{aligned} \quad (2)$$

(3) 考虑紧箍效应和空心效应, 按哈尔滨建筑工程学院提出以下计算公式:

$$\begin{cases} N_u = \beta A_s f_s + A_c f_c \\ \beta = \begin{cases} (1 + 0.95/\sqrt{\gamma})(1 - \psi^2) & \gamma \geq 0.3 \\ [1 + (1.1 + \gamma)/\sqrt{2\gamma}](1 - \psi^2) & \gamma < 0.3 \end{cases} \\ \gamma = 0.3 - 0.32\psi - 0.06\psi^2 \end{cases} \quad (3)$$

(4) 考虑紧箍效应和空心效应, 按浙江电力设计院提出以下计算公式:

$$N_u = A_s f_s + 1.3 A_c f_c \quad (4)$$

以上公式(2)~(4)只是对于重型($\psi \leq 0.5$)的空心的圆钢管混凝土轴心受压计算成立, 对于轻型($\psi > 0.5$)的空心的圆钢管混凝土轴心受压计算只能适用公式(1)。上述公式都是根据试验结合理论假定得出的半理论半经验公式, 由于试验结果都是对 C60 及以下强度等级混凝土得出的, 对于 C80 强度等级的混凝土上述公式都有待进一步研究。

在完成桩身轴向承载力计算后, 按规范计算 TSC 桩身轴向承载力设计值 Q 为:

$$Q = A_p f_c \psi_c \quad (5)$$

其中对于预制桩 $\psi_c = 0.75$ ，结合试验结果，TSC Φ 400 桩身轴向承载力和地基提供的轴向承载力满足设计值大于 3300kN 的要求；TSC Φ 600 桩身轴向承载力和地基提供的轴向承载力满足设计值大于 5000 kN 的要求。因此 TSC 桩可以一对一替代同直径规格钢管混凝土桩。

5. 结论

5.1. TSC 桩的比较优势

相比较常用的钢管混凝土桩、PHC 桩，TSC 桩拥有综合比较优势[3]：

现场打桩试验表明 TSC 桩的抗锤击能力比 PHC 桩优越，因此可以适用于存在较厚的坚硬土层和软弱夹层的地质条件。

现场单桩静荷载试验、实验室短柱轴向压力试验和桩身承载力计算表明 TSC 桩的轴向承载力满足一对一替代同直径规格钢管混凝土桩的要求。

综合比较工程造价，TSC 桩比同口径钢管混凝土桩节省 10% 左右。

5.2. 工程应用

简而言之，TSC 桩是在钢管内注入高强度混凝土，通过离心力使混凝土密实附着钢管内壁而形成中空的复合桩材。针对特征地质区域，尤其是需要将持力层置于粉细砂层之下且必须穿透它的条件下，TSC 桩具有很好的实用价值，因为它既可以象钢管桩一样穿透较厚的硬夹层，仍保证桩身不破坏，又以较小的桩身截面提供了较高的承载力，可以保证工程质量并获得投资节省。

参考文献 (References)

- [1] 钟善桐. 钢管混凝土结构[M]. 第三版. 北京: 清华大学出版社, 2003: 234-251.
- [2] 中国建筑科学研究院. JGJ 94-2008. 《建筑桩基技术规范》[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- [3] 王怀忠. 宝钢工程长桩理论与实践[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2010: 24-31.